連載 オーディオ計測の散歩道

2音法を利用したオーディオ測定

(8)生理学での2音法の使いかた

■小倉幸一■

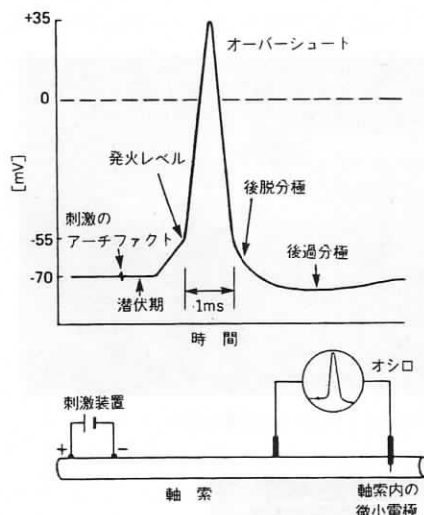
音から生理学的な変化へ

聴覚生理学研究のなかで，2音法の実験をやりました．

音波が耳介に到達すると，外耳道を通って鼓膜を振動，それは中耳(鼓室)内の耳小骨をとおして蝸牛前庭窓を振動させます．ここまでで空気中の振動物理は一応終わります．

つぎからが生物物理(生理学)の世界です．前庭窓(膜)の振動は蝸牛内の液体振動となり，その中の基底膜を振動させます．基底膜の振動はその膜上のコルチ器と総称される振動―電気変換器により電気信号(インパルス)に変換されます．この変換のメカニズムは，基底膜上にある有毛細胞の毛が蓋膜との間で振動により変形を受けることで，スタートします．

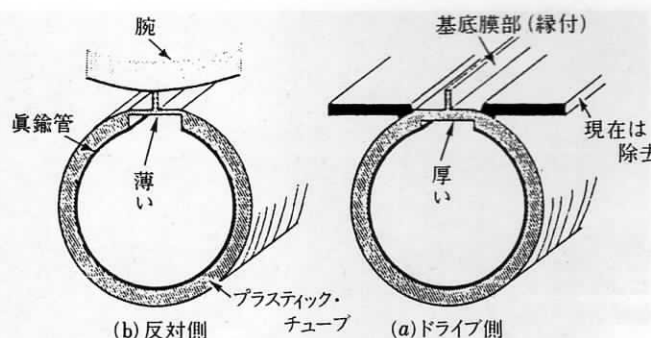
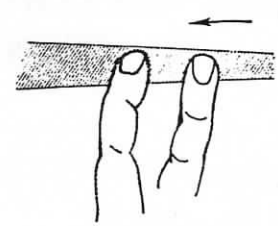
第1図に，発生した電位変化を示します．これはもともと細胞の持っている直流(神経細胞の内側が外側に比べて－60 mV)が振動(興奮)に伴う有毛細胞の脱分極により，約100 mV p-pのインパルスとなります．

これが神経細胞(求心性)を伝わって大脳聴覚領に達したとき，初めて音を感じるのです．ただし，“電線が1本配線された”ようなものではありません．聴覚領に達するまでに数カ所の中継点があります．ある中継点では左右交互に分岐するもの(左からの信号が右脳へ，また，その逆も形成されています)，逆に遠心性神経との接合部を持つ中継点もあります．このような神経繊維が片耳で7万本あまり聴覚系に存在しています．

〈第1図〉
人間の耳の構造(左)と神経に生じるインパルス発生の様子(上)

ところで，聴覚の周波数特性は一般に20から20 kHzとなっています．オーディオ的に考えれば，この範囲の振動を先の神経繊維で分担して大脳に送り込んでいるわけですが，スピーカと違って，聴覚では“聴き分け”が必要です．聴覚でのこの聴き分けは周波数分析と再統合により達成されています．

複合波分のインパルスが到達したとき，「あ，高い音だ…低い音だ…」でなく，その強さや持続時間などから，その意味，言葉なら“あ”か“さ”かを区別しなければなりません．何万本もの神経繊維を伝わるのはパルスです．まさにディジタルなのです．この伝導路ではもとのアナログ波形は存在しません．

こう話が進んでくると，音波の感覚的認識との対応は絶望的ですが，もう一度振り返って見ましょう．インパルスの伝導で，少なくとも振動の持続時間の情報は伝わります．振動がなければパルスは発生しませんから．

つぎは振動の多少(高低)の情報です．振動が強ければ周波数に1：1で対応するパルス列が発生します．第2図に示しましたが，このパルス幅は約1 msecです．したがって1本の繊維で送れる周波数成分は理屈上1 kHzまでとなってしまいます．

〈第3図〉基底膜構造の模型の断面

〈第4図〉基底膜モデルの縁の上に指を2本置く

また，基底膜上で大まかな周波数分析（分解）がおきていることもお話しました．この周波数分解能について振り返ってみましょう．

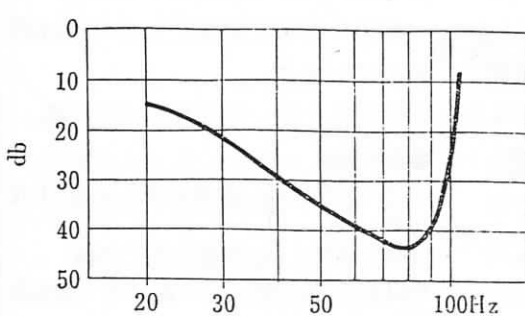
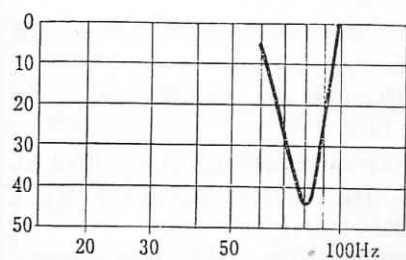
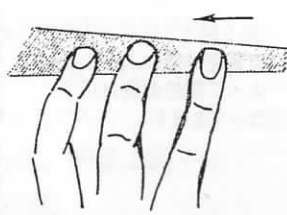
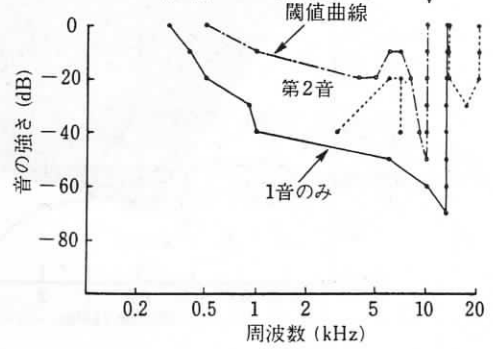
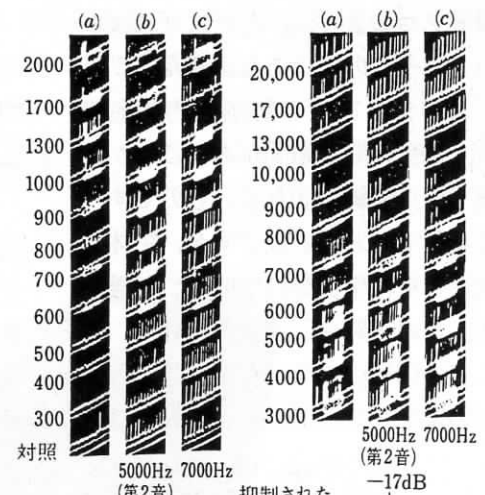
音響心理学の分野では，周波数分解能を静的，動的に測定し，どのくらい周波数が違うと検出できるかを調べていく方法と，さらに周波数が2倍違う音を聴かせたとき何倍に感じるかなど，音の高さの心理尺度の導入を含め多くの研究があります．

発振器ダイアルを少しづつ変えて周波数の変化が検知できる限界を各周波数にわたって調べる静的な手法では，1〜3 kHz で 0.数%の変化を検出できることがわかっています．これは，単純に基底膜（約 30 mm）上での進行波のピークの位置ズレとだけでは考えにくい値ですが，ここで世界に1つしかない基底膜モデルでの実験を紹介しましょう（筆者が保存）．この基底膜モデル（**写真 B**）は，筆者がベケシー教授のもとで実験に関与していた生理グループに遺品としておくられたもので，いま再生実験にかかっているものです．

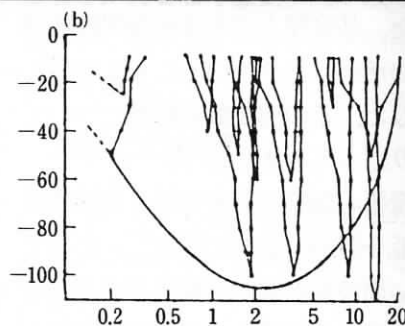
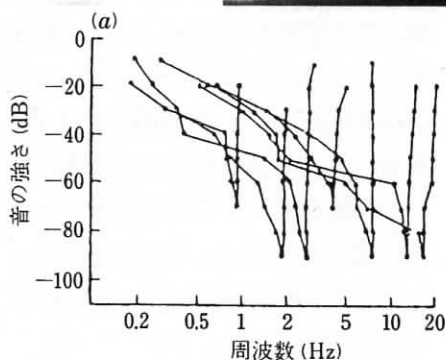
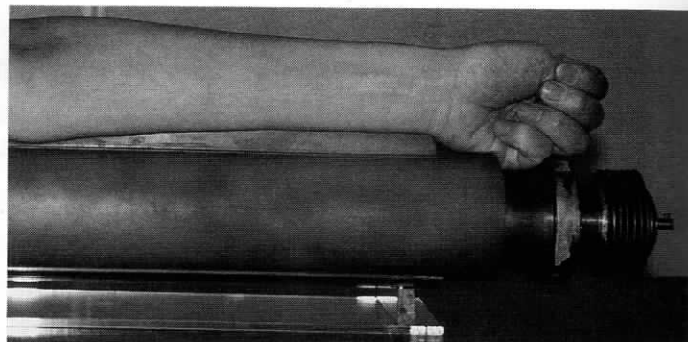
このモデルは，基底膜を 30 cm ほどのプラスティックの円筒上に**第3図**のように作ったもので，中に水を満たします．一端から振動（ピストン）を与えると，その周波数によって基底膜に見立てたプラスティック板（フチ付）の振動位置が変化していきます（進行波）．これを検知するために，この基底膜の上に付いているフチに腕を乗せると，それが実験者の感覚で自覚できるというものです（**写真 C**）．これに**第4図**のように神経に見立てた指をあててみると，周波数変化に対して神経へのインパルス導出が実感できるわけです．

この方法で一本指（中指）をモデルの1点に接触させて周波数を変化させてたとき 80 Hz で最大感度を得，周波数を変えても感じかたは変わらないという結果が得られています．

つぎに**第4図**のように人差し指と中指で実験してみると，**第5図**のグラフのように 80 Hz を越したところで急峻に感度が下がっています．

この図の縦軸（dB）は閾値で，感ずるか否かの境界の強さをプロット

◀〈第5図〉第4図のときに生じる感覚のレスポンス

〈第6図〉指を3本当てると，両側の指の信号が抑制的に働いて中指信号を目立たせる

〈第7図〉▶ 第2表による抑制を示す動物での視覚実験データ

した閾値曲線と呼ばれるものです．したがって，図中 40 dB は振動を 1/100 にしてもまだ感じられることを表しています．ここでは 1 dB の絶対値は表示されていませんが，要は**第 6 図**との比較です．

第 6 図をみるとカーブが急峻になっています．中心 80 Hz から 10 Hz 上げただけで振動を 20 dB 強くしなければ感じなくなったことを表しています．これはなんの結果かというと，図中にあるように，3 本指を当てた時の中指の閾値曲線です．中指に対して両側の指からの信号が"抑制"的働きをし，中指の信号を際立たせたものです．これを聴覚の動物実験で行った結果を**第 7 図**に示します．

《写真 C》
基底膜モデルの上に腕を乗せると，進行波の状況が感覚としてわかる

〈第 8 図〉視覚系では脳に近づくほど周波数に対する感覚は鋭くなって行く

蝸牛神経から脳までの各所に中継点があることを最初にお話しました．この中継点はシナプスといい，ここでは何万本もの神経からのミキシングが行われます．さらに脳からのフィードバック信号もあります．そしてこのミキシングはオーディオ用ミクサのように，ただまぜればよいというものではありません．

このシナプスの解剖学的構造では，送受の間に隙間があることが特徴です．電線が切れているのです．ミキサではお手上げですが，生体ではここを化学物質の放射がつなぎます．この物質を伝達物質といい，ここでの信号のつながりを伝達といっています．ここでのミキシングはこの伝達物質の種類（化学的）の受け渡しで行われます．化学的に相性が悪ければ，ミキサのそのチャネルは SW-OFF となるわけです．この伝導と伝達，さらに側方抑制により蝸牛（基底膜）からのインパルスは選択を受け，f 特的にはシャープになって脳へ送られるのです（**第 8 図**）．

最初の一行で書いた聴覚の 2 音法は，基底膜上での隣接する周波数を加えることで周波数分解能を上げることでした．

こうしてシャープな f 特は聴覚領で最後の仕上げを受け，さらにシャープになると思われて，実験に臨みましたが，あにはからんや，脳ではまたシャープどころかブロードになっていました（**第 9 図**）．ここでは分析されて送り込まれ，信号の統合が行われていたのです．

ここで初めて感覚との関連づけの研究となるわけです．100 億からのニューロン・ネットワークが活躍するわけですが，研究的には視覚野の研究が多いようです．

読物的な内容で紙数を使ってしまいました．また，表現をオーディオの方に近づけたため，生理的に正確さを欠いたきらいもあります．

最後に参考文献を記して今月は終わりにします．

〈第 9 図〉
皮質聴覚領に入るとかえって閾値曲線は広くなってしまう

●参考文献

「医科生理学展望」（原書 18 版）丸善，平成 10 年

「聴覚と声音」（社）気通信学会，1966

亀田和夫「声と言葉のしくみ」（財）口腔保険協会

ベケシー/勝木保次 訳「感覚と抑制」医学書院，1969

桜井芳雄「ニューロンから心をさぐる」岩波書店，2001

「聴覚と音響心理」日本音響学会編，コロナ社，1992

Georg von Eékésy EXPERIMENTAL IN HEARING McGRAW-HILL BOOK COMPANY 1960

山内昭雄・鮎川武二/共著「感覚の地図帳」講談社，2001